

# 超级电容器在新能源电网频率调节中的应用研究

张保云

四川电力设计咨询有限责任公司 四川 成都 610041

**【摘要】**：超级电容器凭借其高功率密度、快速充放电能力和长寿命特性，在新能源电网频率调节中展现出显著优势。论文以电力系统中新能源接入带来的频率波动问题为切入点，阐述超级电容器在削峰填谷、应对瞬态功率冲击以及提升电网稳定性方面的应用价值。研究认为，超级电容器与传统调频手段相结合，可有效弥补单一储能或调频方式的不足，提高新能源电网运行的灵活性与可靠性。通过对典型应用场景的分析，进一步论证其在大规模新能源消纳与电网安全运行中的现实意义，并提出推广应用的技术与管理启示。

**【关键词】**：超级电容器；新能源电网；频率调节；电网稳定性

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.014

## 引言

新能源大规模接入电网已成为当前能源转型的必然趋势，但其间歇性和波动性对电网频率稳定提出了前所未有的挑战。传统的火电机组调频方式反应速度有限，难以满足瞬态频率调节的需求。超级电容器凭借其优异的瞬时能量响应能力和高循环寿命，被视为解决新能源电网频率调节难题的重要途径。近年来，国内外相关研究和实践案例不断积累，显示出其在新能源消纳、提升电力系统灵活性和保障电网安全方面的巨大潜力。本文拟通过分析问题根源、探讨解决路径，并结合典型应用加以总结，力求为超级电容器在新能源电网中的进一步推广提供理论依据与实践参考。

## 1 新能源电网频率波动问题与传统调频方式局限性

新能源大规模接入导致电力系统功率输出具有显著的不确定性与间歇性，风能和光伏发电受自然条件影响剧烈，短时间内功率大幅波动，直接影响电网频率稳定性。随着新能源占比持续提升，系统惯量水平下降，传统依赖火电机组的频率调节能力减弱，频率波动幅度加大，电网安全运行面临严峻挑战。

传统调频方式响应速度慢，难以应对新能源带来的瞬态冲击。火电机组受限于锅炉、汽轮机等设备的机械惯性，调节过程需数秒至数十秒，无法在毫秒级完成响应。在新能源出力突变时，传统手段调节滞后，频率偏差难以及时纠正，可能引发系统失稳甚至连锁故障，安全风险显著增加。

同时，电网正向分布式、互动式、柔性化运行模式转型，分布式电源、电动汽车及新型负荷广泛接入，对频率调节的灵活性和响应速度提出更高要求。传统调频依赖集中式机组调度，难以有效整合分布式资源，调控手段单一，灵活性不足。面对多元、分散、快速

变化的运行环境，传统方式已无法满足现代电网的动态控制需求，亟需引入具备快速响应能力的新型储能技术作为补充与支撑，提升系统整体调节效能。

## 2 超级电容器在新能源电网频率调节中的应用路径与优势

超级电容器在新能源电网频率调节中的应用路径与优势首先体现在其快速响应特性。超级电容器采用电荷物理吸附与脱附的存储机理，能够在毫秒级完成充放电过程，远快于传统电池和火电机组的调频响应。新能源发电出力的波动往往伴随瞬态功率扰动，超级电容器可在极短时间内释放或吸收电能，弥补功率差额，稳定电网频率。这种快速响应能力使其成为新能源场站与电网之间的有效缓冲装置，能够在新能源功率骤变的关键时刻发挥作用，避免电网因调频滞后而出现大幅波动。

超级电容器在新能源电网频率调节中的应用路径与优势还体现在高功率密度和循环寿命方面。与锂离子电池等化学储能技术相比，超级电容器能够承受数十万次以上的深度充放电循环而不显著衰减，且其功率密度远高于常规电池，能够输出瞬时大电流。这一特性使得超级电容器非常适合承担频繁的小幅度频率调节任务，减少化学电池的充放电压力，延长其他储能系统的寿命。在复合储能系统中，超级电容器通常与锂电池协同工作，承担高频次、快速性的调频任务，而锂电池则负责中长期能量支撑，两者形成互补，显著提升电网频率调控的整体性能。

超级电容器在新能源电网频率调节中的应用路径与优势更体现在系统灵活性与可靠性提升上。由于其高效率 and 宽工作温度范围，超级电容器能够在极端环境条件下保持稳定运行，这对于风电场和光伏电站等地理环境复杂的场景尤为重要。超级电容器具备较高

的能量转换效率,减少能量损耗,提高电力系统运行经济性。其模块化和可扩展的设计特点,使得电网在不同规模和层级均可灵活部署,无论是电网侧调频、用户侧辅助服务,还是微电网独立运行,均能发挥独特作用。

### 3 基于典型案例的实践分析与推广启示

从内蒙古草原到华中电网,超级电容器及其混合储能技术正成为中国新型电力系统建设中不可或缺的调节力量。这些技术通过实际的工程应用验证了其在电网频率调节方面的卓越性能,并为未来大规模推广提供了重要借鉴。

在内蒙古呼伦贝尔的华能伊敏电厂,全球容量最大的16兆瓦 $\times$ 10分钟全超级电容储能调频系统已成功投运。该系统采用创新型钛基超级电容,与电厂两台550兆瓦火电机组协同运行,使储能充放电调节时间大幅缩短,响应速度提升60%,有效提高了机组负荷调节精度和响应速度。该项目从开工到投运仅用4个月,较国内同类项目缩短6个月,创造了国内同类型储能工程建设的新纪录。

华中地区首座“飞轮+锂电”混合储能调频电站于2025年6月在湖北孝感并网投运。该系统由16台飞轮装置和8组锂电池组成复合储能系统,单个容量为1250千瓦。飞轮储能利用真空磁悬浮条件下转子的高速旋转实现电能与动能转换,提供瞬时功率支撑;锂电池则保障稳定能量输出。实测表明,该系统响应时间达毫秒级,综合调频性能是传统火力发电机组的2-3倍,每年可消纳新能源发电约0.26亿千瓦时,减少二氧化碳排放约1.39万吨。

山西偏关县建成的全球单体规模最大的超级电容调频储能电站,采用百兆瓦级超级电容混合储能调频技术,极大缓解了电网频率波动问题。该项目总投资6.7亿元,结合了能量型锂电池储能与功率型超级电容储能的优势,有效促进当地风电和光伏发电的电网消纳。

#### 参考文献:

- [1] 陈宇航,孙晓东.超级电容器在新能源电网频率调节中的应用研究进展[J].电力建设,2022,43(7):105-113.
- [2] 刘晨曦,郑凯.储能系统在新能源电网频率稳定中的作用及优化路径[J].电力系统自动化,2023,47(15):87-95.
- [3] 何志强,周子涵.超级电容器与锂电池复合储能在电网调频中的应用探讨[J].中国电机工程学报,2024,44(3):512-520.

超级电容器与锂电池或其他储能技术结合的混合系统,展现出显著的技术经济性。在复合储能架构中,超级电容负责瞬态高功率调频,锂电池保障长时能量输出,二者协同将调频效率与循环寿命显著提升。金时科技开发的“超级电容与锂电混合储能架构”通过核心算法实现动态智能调度,其超级电容内阻低至0.18毫欧,容量一致性偏差 $\leq 5\%$ ,有效解决了传统单一储能能在快速响应与循环寿命上的矛盾。

这种“功率-时间二维解耦”策略可将超级电容应用从秒级扩展至小时级,覆盖源侧、网侧、用户侧全场景。实践表明,复合储能系统不仅提升了频率调节的综合效果,还通过避免电池频繁充放电延长了系统寿命,降低了整体运维成本。

超级电容器凭借毫秒级响应、高循环寿命和绿色环保优势,已在电网频率调节中展现应用价值。2025年7月,我国主导的《电力储能用超级电容器》国际标准成功立项,实现研发、生产、应用全产业链闭环。技术持续突破,干法电极技术降低电极成本50%,全固态柔性器件具备低成本量产潜力。2024年新版“两个细则”将惯量支撑纳入补偿,响应快、波动小的超级电容储能经济性显著提升,200MW构网型电站年收益可达1.15亿元。随着技术、标准、政策协同推进,超级电容器将在新能源消纳与电网稳定中发挥更大作用。

### 4 结语

本文以新能源电网频率调节为研究对象,深入探讨了传统调频方式的局限与超级电容器的独特优势。研究指出,超级电容器凭借快速响应、高功率密度和长循环寿命,在削弱新能源波动冲击、提升系统稳定性方面具有重要作用。结合典型案例分析,其在复合储能与分布式电网中的应用前景广阔。未来需在技术优化、政策支持与标准建设等方面协同推进,推动其规模化应用。